



Desarrollo de un sistema de oceanografía operacional para zonas costeras: PORT21

Felipe Collado Lizama , Paolo Gyssels , Marc Mestres , Andrés Rodríguez & Alonso B. Rodríguez

To cite this article: Felipe Collado Lizama , Paolo Gyssels , Marc Mestres , Andrés Rodríguez & Alonso B. Rodríguez (2020) Desarrollo de un sistema de oceanografía operacional para zonas costeras: PORT21, Ribagua, 7:1, 28-42, DOI: [10.1080/23863781.2020.1804812](https://doi.org/10.1080/23863781.2020.1804812)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2020.1804812>



© 2020 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 18 Aug 2020.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 28



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



Desarrollo de un sistema de oceanografía operacional para zonas costeras: PORT21

Felipe Collado Lizama^a, Paolo Gyssels^b, Marc Mestres^{a,c}, Andrés Rodríguez^b and Alonso B. Rodríguez^d

^aNereo Ingeniería, Barcelona, Spain; ^bLaboratorio de Hidráulica (LH), Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Córdoba, Argentina; ^cLaboratori d'Enginyeria Marítima (LIM), Universitat Politècnica de Catalunya-Barcelona Tech (UPC), Barcelona, Spain; ^dNereo Ingeniería, Santiago de Chile, Chile; Universidad Nacional de Córdoba, Laboratorio de Hidráulica, Av. Filloy s/n, Córdoba, 5000 Argentina Universidad Nacional de Córdoba, Laboratorio de Hidráulica, Av. Filloy s/n, Córdoba, 5000 Argentina

RESUMEN

El objetivo de este artículo es la presentación del Sistema PORT 21 de previsión de oleaje y Oceanografía Operacional (OO) de aplicación en la Región Sudamericana. Para la comprensión integral del sistema se citan los modelos usados y se muestra en primer lugar la metodología adoptada para su integración en la implementación de PORT 21. Posteriormente se describen los casos estudiados para ilustrar el funcionamiento del sistema, incluyendo un caso de validación y calibración del sistema en el sur de Chile, para finalmente resumir los resultados hasta ahora obtenidos. Se presenta una revisión de las dependencias de datos de entrada que tiene el sistema describiéndose los diferentes modelos y fuentes de datos de viento y de oleaje existentes en el estado del arte, alguno de los cuales han sido seleccionados para el uso rutinario del sistema. En las conclusiones sobre los resultados obtenidos, se realiza un análisis crítico respecto de los objetivos alcanzados hasta la fecha y se describen las tareas a realizar en el futuro.

PALABRAS CLAVE

Sistema de previsión de oleaje; oceanografía operacional; PORT 21; costas sudamericanas; acoplamiento de modelos

KEYWORDS

Wave forecasting system; operational oceanography; PORT 21; South American coasts; model coupling

Development of an operational oceanography prediction system for coastal zones: PORT 21

ABSTRACT

The objective of this article is the presentation of the PORT 21 System for forecasting waves and Operational Oceanography (OO), of application in the South American Region. First, the models used are explained, and the methodology adopted for their integration in PORT 21 is shown to facilitate the understanding of the system. Then, the cases studied to validate and calibrate the system are described; finally, the results so far obtained are summarized. A review of the input data required by the system is presented, describing the different models and sources of wind and wave data, some of which have been selected for routine use of the system. In the conclusions, a critical analysis is developed regarding the objectives achieved to date, and the tasks to be carried out in the future are described.

1. Introducción

En el mundo existen numerosos sistemas operacionales de predicción de oleaje (e.g. Tonani et al., 2019; Quiao et al., 2019; Sandhya et al., 2018; Salinas Prieto, 2014; Rusu y Soares, 2013), pero en el hemisferio sur el desarrollo de las herramientas operativas aún está en curso (e.g. en el Atlántico sur el pronóstico de oleaje está a cargo del SMN de Argentina, Etala et al., 2014, y para el Pacífico el presente trabajo), y la disponibilidad de datos es menor (e.g. Gyssels et al., 2013; 2015; Rodríguez et al., 2005). Por ello en el presente artículo se presenta el Sistema PORT 21 de Previsión de Oleaje y de Oceanografía Operacional (OO) para zonas costeras. Esta es una herramienta actualmente en desarrollo, para dar respuestas a las necesidades

operativas de las entidades públicas o privadas que funcionan en zonas costeras de la región sudamericana principalmente. Uno de los resultados importantes que se pretende alcanzar con PORT 21 es la conformación de redes virtuales de boyas numéricas, localizadas a lo largo de extensas franjas del litoral, que a intervalos horarios, entregarán la previsión oceanográfica en dichas zonas costeras. Esto permitirá, entre otras, (1) complementar la información entregada por las escasas boyas físicas disponibles, (2) complementar la escasa información de corrientes litorales entregada por los correntómetros emplazados en diversos estudios de campo realizados en el pasado, (3) reducir drásticamente todos los enormes costos asociados a la adquisición, mantención y

operación de las boyas físicas (olígrafos, mareógrafos y/o correntómetros); y (4) proveer en tiempo real y de manera continua de información de la OO completa, precisa y oportuna a todos aquellos organismos que actúan en actividades marítimas, costeras y portuarias posibilitando con ello la optimización de sus diversas labores.

Los primeros pronósticos de oleaje sistemáticos generados mediante modelación numérica fueron realizados hace aproximadamente 50 años por el National Weather Service (NWS) de Estados Unidos. Estos primeros modelos entregaban como resultado la altura y el período de ola significativa en cada punto de malla del dominio físico de interés, utilizando una relación directa entre la velocidad del viento y las propiedades del oleaje. Este enfoque de ola representativa todavía no conseguía ajustar suficientemente bien la complejidad de los patrones de oleaje, limitando por tanto las capacidades predictivas de los pronósticos. Posteriormente, se adoptó una descripción espectral del oleaje, donde la distribución de energía de onda es analizada en el dominio de la frecuencia y las direcciones. Los modelos numéricos de oleaje espectral, basados en el espectro de energía de onda $F(f, \theta)$, que expresa la distribución de energía de onda en términos de la frecuencia f y dirección θ , adoptaron ecuaciones de conservación del tipo:

$$\frac{DF(f, \theta)}{Dt} = S_{in}(f, \theta) + S_{nl}(f, \theta) + S_{ds}(f, \theta) \quad (1)$$

donde los términos S representan fuentes y sumideros de la energía de onda. Específicamente, S_{in} representa la entrada de energía por efecto del viento, S_{nl} representa las interacciones no lineales entre ondas y S_{ds} es un término de disipación asociado a la rotura de las olas (o ‘whitecapping’). Inicialmente, la ecuación (1) representaba el espectro de energía observado bajo condiciones de aguas profundas, pero con el tiempo luego se fue enriqueciendo al considerar procesos físicos propios de aguas someras tales como la fricción con el fondo y la rotura del oleaje, entre otros. Este importante refinamiento en la descripción del estado del oleaje permitió una modelación más completa y condujo a pronósticos con un mayor potencial predictivo.

La clasificación de los diferentes modelos espectrales se basa principalmente en el tratamiento del término de interacción no lineal (S_{nl}). En la última generación de modelos, S_{nl} es calculado explícitamente y la forma espectral se desarrolla dinámicamente, gracias a la introducción de la “Aproximación discreta de interacción no lineal (DIA)”. Desde la creación del modelo WAM (Wamdi Group, 1988), sólo un limitado número de nuevos modelos de tercera generación han sido desarrollados, tales como WAVEWATCH III (WW3; Tolman, 2009) y SWAN (Boij et al., 1996), los

cuales han sido escogidos para la implementación de PORT 21, utilizando una estrategia de dominios anidados que permite obtener la previsión de las condiciones de OO en los diferentes dominios de interés.

2. Metodología

2.1. Modelos matemáticos en los que se apoya el sistema PORT 21

Como se ha establecido anteriormente, los sistemas de previsión de oleaje necesitan para realizar sus previsiones de oleaje de dos tipos de modelos numéricos que en principio actúan acopladamente, uno Atmosférico y uno de Oleaje. El modelo atmosférico es tipo GFS (Global Forecast System) creado por el NCEP (National Centers for Environmental Prediction) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) a escala global. Este es un modelo de pronóstico del tiempo acoplado, compuesto por cuatro modelos separados que trabajan juntos para proporcionar una imagen precisa de las condiciones climáticas. GFS cubre todo el globo hasta una resolución horizontal de 28 km.

Con esto se pasa a un modelo de generación de oleaje. PORT 21 trata la información de viento como una variable exógena en las diferentes escalas espaciales en que éste opera.

PORT 21, al igual que los principales sistemas de previsión de oleaje existentes en el mundo (Dietrich et al., 2011), utiliza los modelos de generación de oleaje WAVEWATCH y SWAN, descritos más adelante. De la ejecución de dichos modelos se obtiene una gran cantidad de variables de oleaje con salidas cada cierta unidad de tiempo (habitualmente tres horas en función de los temporales del Atlántico Sur), siendo las más importantes:

- espectro direccional del oleaje,
- altura significativa de ola, dirección y periodo medio de ola,
- periodo del pico del espectro,
- parámetros de oleaje, discriminados por las dos componentes típicas del oleaje: la de mar de fondo u oleaje generado mar adentro (tipo *Swell*) y mar de viento (tipo *Sea*) u oleaje generado cerca de la costa.

Complementando los dos modelos de oleaje para mar abierto descritos anteriormente, PORT 21 incorpora sendos modelos para incorporar de la previsión de la agitación anterior: ARTEMIS (Aelbrecht, 1997) y de las corrientes litorales y costeras: ADCIRC (Luettich et al., 1992).

Modelo de oleaje WAVEWATCH

WAVEWATCH III (WW3) es un modelo espectral de olas oceánicas que cuenta con capacidades particularmente destacables en la predicción del mar de fondo generado a gran distancia de la costa, gracias a los avanzados métodos numéricos incorporados en los algoritmos que tratan la propagación del oleaje a través del mar. WW3 es un modelo de tercera generación desarrollado por la NOAA del gobierno de Estados Unidos, específicamente, la OMB (Ocean Modeling Branch) perteneciente al NCEP. Este modelo se basa en anteriores versiones (WAVEWATCH I y II) desarrolladas por la Universidad de Delft. PORT 21 utiliza la versión 3.14 de WW3.

Modelo de oleaje Simulating Waves Nearshore (SWAN)

SWAN, desarrollado en Holanda por la Universidad Tecnológica de Delft, es un modelo de propagación de olas especialmente desarrollado para ambientes de aguas poco profundas (SWAN, 2006). El modelo está basado en la ecuación de balance de la energía en presencia de corrientes, con fuentes y sumideros. El modelo presenta la posibilidad de usar mallas curvilíneas que no tienen que estar orientadas en la dirección media del oleaje y mallas no estructuradas que se adaptan a las particularidades geométricas de la costa. PORT 21 utiliza la versión 4091 de SWAN para mallas no estructuradas.

Modelo de agitación interior ARTEMIS

El modelo ARTEMIS (Agitation and Refraction with TElemac on a Mild Slope; ARTEMIS, 2014) está diseñado principalmente para aplicaciones de agitación interior en puertos o bahías de pequeño tamaño. Este modelo resuelve la ecuación de pendiente suave o ecuación de Berkhoff (ec. 2) en su forma elíptica utilizando técnicas de elementos finitos y ofrece como resultados principales la altura, fase y dirección de la onda,

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \phi) + C C_g k^2 \phi = 0 \quad (2)$$

donde C y C_g son las celeridades o velocidades de fase y grupo de ondas,

$$C = L/T = (gT/2\pi) \tanh(kH) \quad (3)$$

$$C_g = C/2 (1 + 2kh / \sinh(2kH)) \quad (4)$$

T es el período, k es el número de onda ($k = 2\pi/L$), L es la longitud de onda, H es la profundidad media, ∇ es el operador gradiente y $\nabla \cdot$ es el operador divergencia, ambos referidos a coordenadas horizontales. La incógnita $\phi(x,y)$ es el potencial de velocidad (que es en general un número complejo).

Para un tratamiento teórico detallado de ésta ecuación y sus variantes se refiere el trabajo de Huang (2009).

Modelo de corrientes en medio litoral ADCIRC, ADCIRC (2014).

Además de los modelos de oleaje, el sistema contempla la utilización del modelo hidrodinámico ADCIRC. Este es un sistema de programas informáticos para resolver problemas de transporte y circulación en superficie libre y dependientes del tiempo en dos y tres dimensiones.

La versión 2D de ADCIRC resuelve la ecuación de continuidad verticalmente integrada para el desplazamiento de la superficie del agua ζ :

$$\partial \zeta / \partial t + \partial(UH) / \partial x + \partial(VH) / \partial y = 0 \quad (5)$$

donde H es la profundidad media, U y V son las velocidades medias horizontales promediadas en la vertical en las direcciones x e y .

Las ecuaciones de cantidad de movimiento verticalmente integradas son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV \\ = -g \frac{\partial[\zeta + P_s / g\rho_0 - \alpha\eta]}{\partial x} \\ + \frac{\tau_{sx}}{H\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{H\rho_0} + \frac{M_x}{H} - \frac{D_x}{H} - \frac{B_x}{H} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU \\ = -g \frac{\partial[\zeta + P_s / g\rho_0 - \alpha\eta]}{\partial y} \\ + \frac{\tau_{sy}}{H\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{H\rho_0} + \frac{M_y}{H} - \frac{D_y}{H} - \frac{B_y}{H} \end{aligned} \quad (6)$$

donde f es el parámetro de Coriolis, ρ_0 es la densidad del agua, M_x es el gradiente de tensión lateral verticalmente integrado en x , D_x es la dispersión de cantidad de movimiento en x , B_x es el gradiente de presión baroclínico verticalmente integrado, τ_{sx} es la tensión de corte en la superficie en la dirección x (e.g. viento), τ_{bx} es la tensión de corte de fondo en la dirección x (e.g. fricción), P_s es la presión atmosférica, g es la aceleración de la gravedad, η es el potencial por marea, α es el factor de elasticidad efectivo de la tierra (0,69) y ζ es la diferencia de cota entre la superficie libre y la profundidad media.

La descripción más detallada de estas ecuaciones 2D así como las 3D utilizadas en ADCIRC pueden verse en los dos Informes del USACE de Luetlich et al. (1992) y Westerink et al. (1994) y su descripción teórica en el libro de Luetlich y Westerink (2004). Estos programas utilizan el método de elementos finitos en el espacio y, por lo tanto, pueden ejecutarse en cuadrículas altamente

flexibles e irregulares. Las aplicaciones típicas de ADCIRC han incluido: modelado de mareas y circulación impulsada por el viento en aguas costeras, predicción de marejadas e inundaciones de tormentas de huracanes, estudios de factibilidad de dragado y eliminación de materiales, estudios de transporte de larvas, modelado fluvial para corrientes y niveles de agua, y modelado baroclínico costero desde escala de laboratorio hasta escala de campo.

Sus principales características son:

- * Uso de coordenadas cartesianas o esféricas.
- * Capacidades integradas de profundidad bidimensional (2DDI) y 3D.
- * Elementos de mojado/secado (presencia o no de agua en las celdas numéricas) completos (2D y 3D).
- * Elementos de barrera (por ejemplo, diques).
- * Conductos y barreras porosas.
- * Análisis armónico ('sobre la marcha').
- * Inicio o arranque computacional en 'frío' o 'caliente', es decir con condiciones iniciales sin estabilizar o ya estabilizadas.
- * Dominio grande: estrategia de resolución localizada para simplificar la especificación de condiciones de frontera a menudo muy difícil.
- * El modelo con difusión numérica muy baja permite que los parámetros del modelo se basen en valores físicamente relevantes de acuerdo con las ecuaciones de gobierno.

ADCIRC se ejecuta en un sistema operativo con un compilador Fortran, en computadoras de un solo procesador y computadoras paralelas usando MPI, Formatos de salida ASCII y NetCDF.

2.2. Descripción del sistema PORT 21

PORT 21 está concebida como una herramienta para dar servicios de OO que entrega una previsión de la Oceanografía Portuaria y Costera capaz de integrar en tiempo real y de manera continua toda la información de clima marítimo, tanto a nivel oceánico como regional y local, dando predicciones oceanográficas (principalmente viento, oleaje, mareas, superficie del mar en zonas confinadas y corrientes) con elevada precisión en un determinado dominio del litoral costero del mundo con un horizonte temporal mínimo de 96 horas, pudiendo ser mayor. El sistema está conformado por diferentes módulos asociados a uno o más modelos matemáticos, los cuales son integrados mediante interfaces específicamente desarrolladas con este fin, de modo que la información que éstos proveen es utilizada oportuna y adecuadamente por los demás componentes del sistema. El sistema tiene capacidades predictivas en diferentes ámbitos de la OO (Figura 1):

- PORT 21-W (*Waves*): Predice el oleaje en zonas que van desde aguas profundas hasta la costa, incluyendo variaciones de niveles por marea.

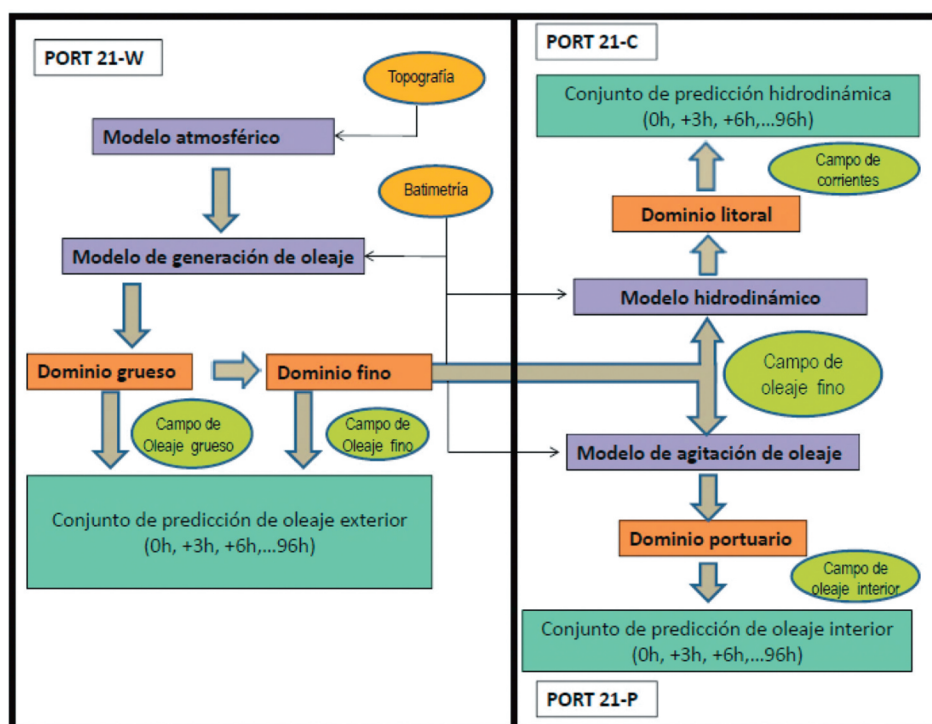


Figura 1. Ámbitos de trabajo y esquema de funcionamiento del Sistema PORT 21.

- PORT 21-T (*Tides*): Predice las variaciones del nivel por mareas astronómicas.
- PORT 21-P (*Port*): Predice la agitación interior en las áreas portuarias.
- PORT 21-C (*Current*): Predice las corrientes litorales, marea, transporte sedimentario y evolución de playas.

PORT 21 integra complejos modelos matemáticos de código libre y abierto ('open-source') con herramientas de computación de alto desempeño y elementos del ámbito de ingeniería costera y de hidráulica marítima.

El método de cálculo de previsión hidrodinámica se integra por varios modelos acoplados entre sí de manera secuencial cuyas principales características se resumen en la [Tabla 1](#).

Para un eficiente desempeño de PORT 21, a pesar de estar sus códigos paralelizados, resulta necesario utilizar el sistema en centros de supercomputación.

2.3. Dominios físicos establecidos en el sistema PORT 21

Idealmente, sería deseable resolver la generación del oleaje por el viento en el dominio global (correspondiente al mundo entero) con una resolución espacio-temporal del orden de unos pocos metros y de decenas de minutos, que permitiera conocer simultáneamente el oleaje a escala oceánica (OC), local (LO) y litoral (LI) y portuaria (PU). No obstante, esta opción resulta prácticamente inasumible en virtud de los elevados costos computacionales. La metodología adoptada por el sistema se basa en los siguientes conceptos básicos:

Se comprueba la disponibilidad vía NOAA de datos de *forecasting* para el dominio global (cuatro simulaciones diarias con un horizonte temporal de 180 horas y una resolución de 0.5°).

Se crean dominios oceánicos (OC) para modelar las áreas costeras desde aguas profundas, con resolución del orden de fracciones de grados, mediante WAVEWATCH III.

Se definen dominios locales (LO) con un tamaño del orden de 2°×2° (cubriendo distancias de decenas de km),

tratados por PORT 21 con el modelo SWAN en su versión para mallas no estructuradas. La resolución de los dominios locales es variable, teniendo mayor definición en las zonas que se correspondan con dominios litorales (LI).

Mediante el uso de PORT 21-T éstos se tienen en cuenta para la simulación de las variaciones de nivel en el dominio LO.

En caso de disponerse de información local de viento de mesoescala, éstos se tienen en cuenta para la simulación del dominio LO.

Dentro de los dominios LO se definen zonas litorales (LI), las cuales tienen una resolución adaptada al sitio que se desea analizar.

Las zonas costeras definidas para modelar la agitación del oleaje en las áreas portuarias (PU) interiores, de un tamaño del orden de pocos cientos de metros y con celdas del orden de metros, son tratadas por PORT 21.

El esquema general de simulación es presentado en la [Figura 2](#), donde adicionalmente se indica que los datos de vientos a nivel LO son obtenidos de fuentes específicas para cada zona (e.g. Servicio Meteorológico Nacional SMN, para el caso de Argentina).

2.4. Acoplamiento y adaptación de los modelos matemáticos en PORT 21

La versión del modelo WAVEWATCH III considerada por PORT 21 es la 3.14. El modelo consiste de varios programas escritos en Fortran, algunos de las cuales han sido de algún modo modificadas para facilitar su uso en PORT 21 y el acoplamiento de los diferentes módulos del sistema: (i) el Programa de Condiciones Iniciales; (ii) el Modelo de olas; el Post-procesadores de Salida numérica.

El programa del modelo de oleaje convencional, ha sido ligeramente modificado para aceptar como entrada un archivo con las condiciones de contorno adecuadamente extraídas de la información NOAA, y ha sido adaptada para permitir la generación de hasta 99 archivos con condiciones de frontera para dominios más pequeños. La versión 3.14 del modelo introduce la

Tabla 1. Principales características del sistema PORT 21.

Modelos	WW3	SWAN*+ARTEMIS*+ADCIRC* *: malla no estructurada
Escala espacial	0,5°–0,05°	O(m) O(m) O(m)
Resolución temporal	1 hora	
Recalculo	6 horas	
<i>Forecasting</i>	4–6 días	
<i>Hindcasting</i>	Hasta 30 días	
Ola de tormenta	Setup meteorológico	Se puede incorporar el setup a escala SWAN, (marea en desarrollo con ADCIRC)
Datos de ingreso	GFS a nivel global	WRF con instituciones locales

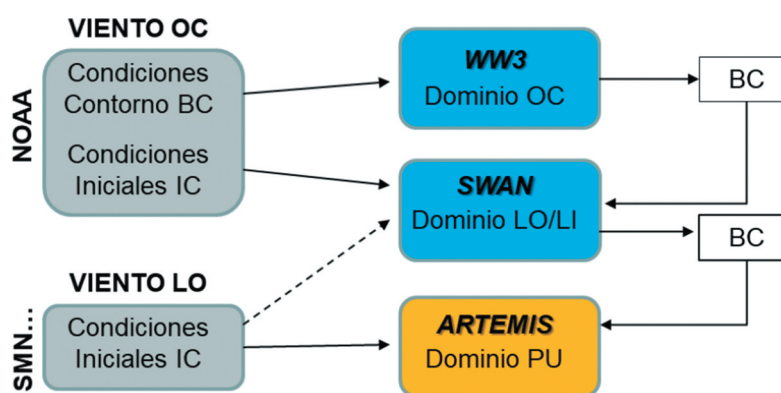


Figura 2. Metodología general OC-LO/LI-PU de dominios anidados unidireccionalmente especialmente desarrollada para el sistema PORT 21, con dominios litorales incrustados en su respectivo dominio local.

aproximación multi-malla o de mosaico al modelado del oleaje a través del desarrollo del programa (Tolman, 2009). En este programa, se considera un cierto número de mallas de resolución variable, con transferencia de información entre las distintas mallas en cada instante de tiempo relevante. A cada malla o dominio se le asigna un número de rango, de tal modo que los rangos más pequeños están asociados a las mallas con resolución más gruesa, y rangos iguales corresponden a dominios con resolución parecida (aunque no necesariamente igual). En este caso se consideran los siguientes tres tipos de transferencia de información entre distintos dominios: transferencia de información de rangos menores a rangos mayores; transferencia de información de rangos mayores a rangos menores y transferencia de información entre dominios de igual rango.

El modelo actúa secuencialmente de la siguiente forma:

- El modelo WW3 trabaja en modalidad multiproceso. La transferencia de datos desde dominios de rango menor a dominios de rango superior se consigue en WW3 proporcionándoles a éstos últimos las condiciones de contorno.
- El modelo SWAN trabaja en modalidad multiproceso. Toma los resultados espectrales de WW3 y para cada dominio local los incorpora como datos de entrada a lo largo de la frontera en mallas no estructuradas.
- Por su parte, y para cada dominio portuario, el modelo ARTEMIS toma los resultados de SWAN en forma de datos resúmenes para determinar las condiciones frontera. El modelo ARTEMIS, que también utiliza una malla no estructurada, se emplea en su modalidad para oleaje espectral unidireccional.

- En cuanto a la simulación de corrientes, el modelo ADCIRC se incorpora en PORT 21 en su versión de acople SWAN + ADCIRC, siguiendo la metodología propuesta por Tolman (2009).

3. Resultados

PORT 21 es una herramienta de previsión de oleaje suficientemente versátil como para poder utilizarse en cualquier entorno costero del mundo. En la actualidad se ha avanzado en la aplicación del sistema a tres zonas específicas del mundo:

1. Vertiente sudamericana del Pacífico.
2. Vertiente sudamericana del Atlántico.
3. Mediterráneo occidental.

En el presente artículo se muestran las experiencias de implementar el sistema en el ámbito americano correspondiente a las vertientes Atlántico y Pacífico de Sudamérica (Figuras 5b y 11 respectivamente).

3.1. Ejemplo de calibración

Si bien el modelo no ha sido calibrado aún con datos de oleaje de la costa atlántica, pudo ser calibrado con datos de oleaje en el Pacífico sur. Para ilustrar lo adecuado de la capacidad predictiva del sistema en el ámbito oceánico, se muestran las Figuras 3 y 4. En términos cuantitativos, la Figura 3 muestra esta comparación para un punto en el sur de Chile ubicado en las coordenadas 74O, 37S, presentando las series temporales de los principales parámetros asociados al espectro direccional (altura de ola, periodo de pico espectral). El evento corresponde al día 15/05/13, con vientos de dirección Sur con intensidades entre 20 y 25 nudos, registrados en la Estación No.370033 de la Dirección Meteorológica de Chile.

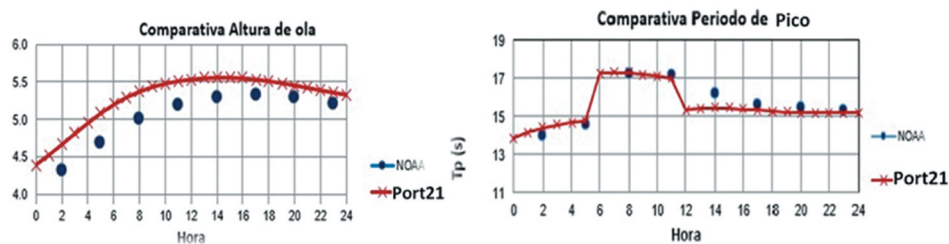


Figura 3. Resultados de altura de ola significativa H_s y periodo de pico espectral T_p del oleaje obtenida con PORT 21 en el punto exterior (740, 375) y datos de la NOAA (15/05/13).

Las alturas de ola simuladas sobrestimaron en menos de un 10% a las medidas por la NOAA, mientras que los periodos de pico espectral ajustaron muy bien.

En la [Figura 4](#) se puede hacer una comparación general de las direcciones del oleaje donde los vectores muestran patrones muy similares.

3.2. Implementación del sistema PORT 21 en el Hemisferio Sur

3.2.1. Atlántico Sur

Los modelos se anidan tres dominios sucesivamente de Oceánico a Local y Litoral: OC→LO→LI. Para la aplicación del sistema PORT 21 a la cuenca del Atlántico se ha creado el dominio Oceánico OC mostrado en la [Figura 5b](#), el cual se resuelve con el modelo WW3.

Los resultados del OC son tomados como datos de entrada en los contornos de los dominios Locales LO. Para la vertiente sudamericana del Atlántico se han creado 13 dominios locales LO mostrados en la [Figura 6a](#), y además incorpora una base de datos con boyas

numéricas de *hindcasting* (estadísticas de más de 30 años) señaladas con asteriscos verdes en la [Figura 6b](#).

En la [Figura 7](#) se presenta el Dominio Local LO de Chubut y el pronóstico para el día 15/10/2014, resuelto con SWAN.

Finalmente, los resultados del dominio LO son utilizados como entrada para las simulaciones en el Dominio Litoral LI (Costero de Chubut), [Figura 8](#) (izquierda).

En la [Figura 9](#) se muestra el mallado de detalle y la [Figura 10](#) la penetración del oleaje en el subdominio Portuario PU (Comodoro Rivadavia) para el día 17/10/14.

3.3. Implementación del sistema PORT 21 en el Pacífico sudamericano

3.2.2. Pacífico Sur

De forma análoga, en el ámbito de la cuenca del Pacífico sudamericano el sistema modela el dominio OC del Pacífico ([Figura 11](#)), y 15 dominios LO que cubren la costa Chilena. Es importante señalar que el

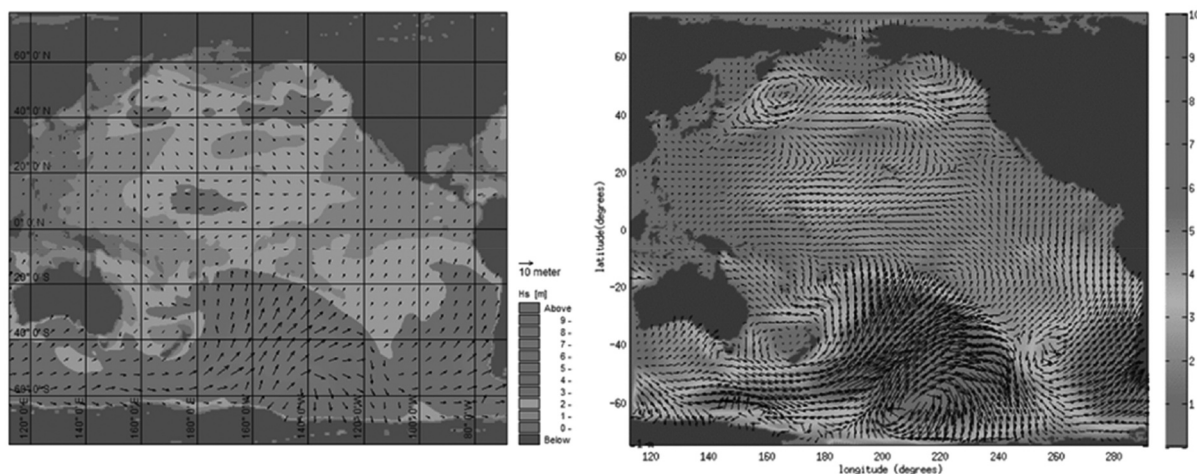
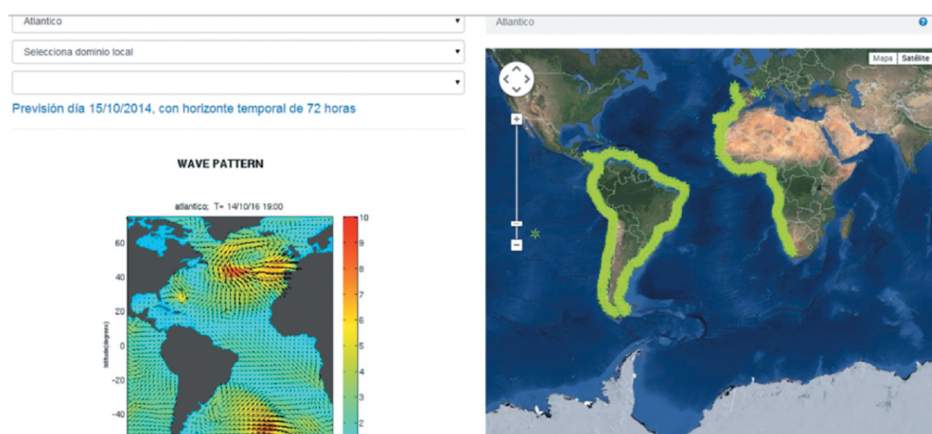
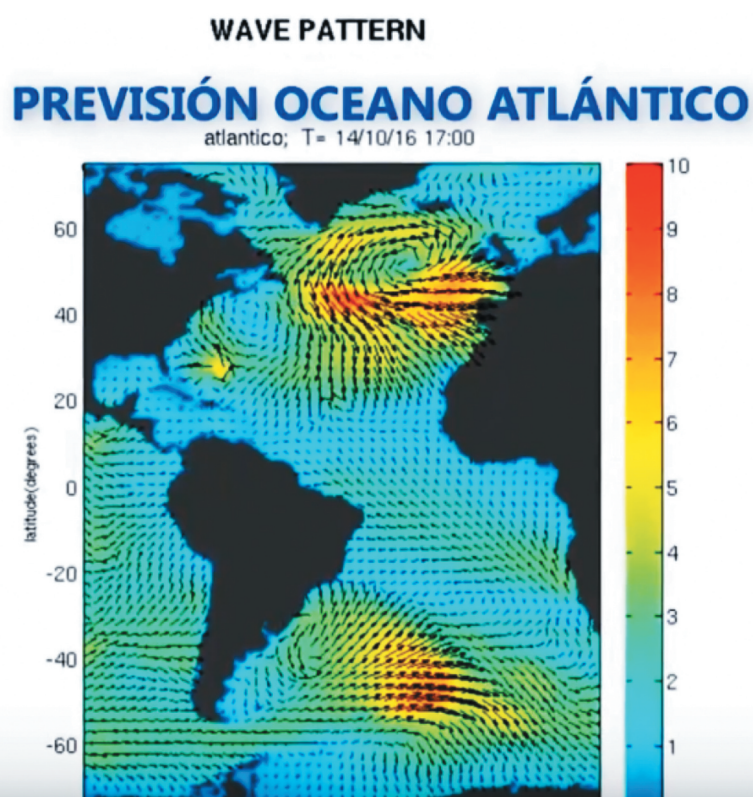


Figura 4. Patrón de direcciones de oleaje en el dominio OC Pacífico, para el 15/05/2013: simulado con WW3 por NOAA (izquierda) y con PORT 21 (derecha).



Dominio Oceánico

a. Ejemplo Dominio Oceánico: Cuenca del Atlántico.



b. Patrón de Oleaje, Dominio Oceánico: Cuenca del Atlántico 16/10/2014.

Figura 5. (a) Ejemplo Dominio Oceánico: Cuenca del Atlántico. (b) Patrón de Oleaje, Dominio Oceánico: Cuenca del Atlántico 16/10/2014.

sistema tiene la capacidad de extender su aplicabilidad estableciendo mayor número de dominios LO que cubran el resto de la costa americana del Pacífico.

Para ilustrar el funcionamiento del sistema en los tres ámbitos o niveles de anidamiento (OC→LO→LI) se muestra una secuencia para los días 6 y 07/04/2017.

En las Figuras 11, 12 y 13 se muestran respectivamente estas simulaciones.

En la Figura 14 se presenta el Subdominio Portuario para el Puerto de Valparaíso, tomando como entrada los valores de la boya numérica Nro. 002 localizada en el borde exterior del dique de abrigo (indicada con una flecha en Figura 14).

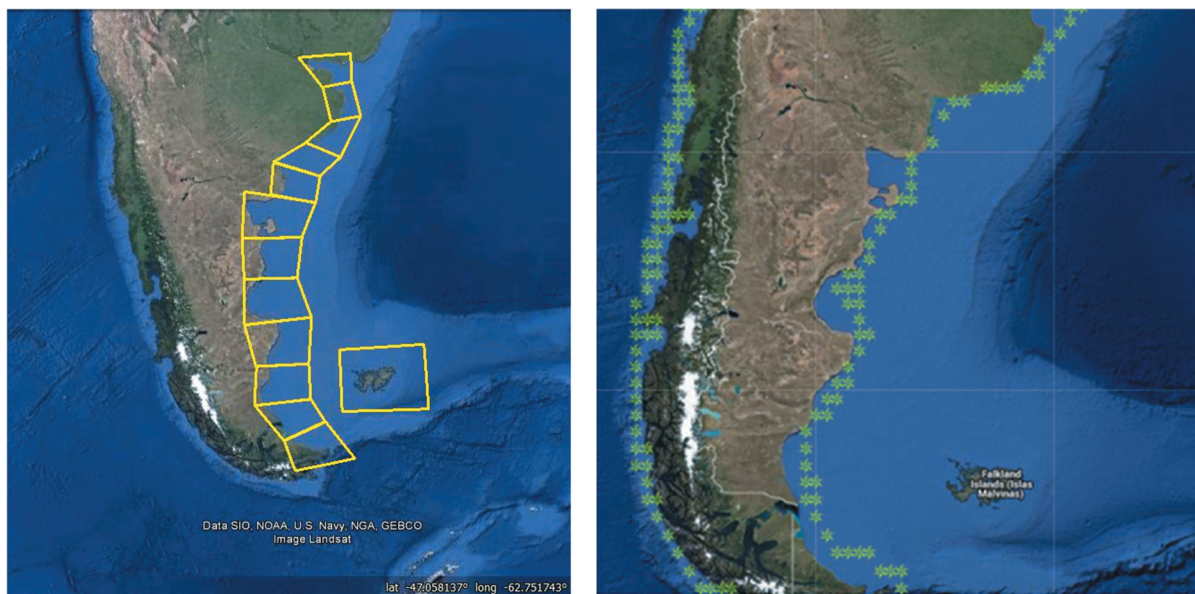


Figura 6. (a, izquierda) Dominios Locales en el Atlántico Sur. (b, derecha) Boyas numéricas en costas de América del Sur con datos de hindcasting.

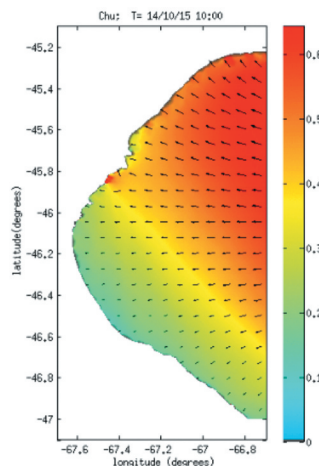


Figura 7. Ejemplo de Dominio Local Provincia de Chubut y Golfo de San Jorge.

3.4. Ejemplo de predicción del oleaje por el Huracán Irma (Septiembre 2017)

Otro ejemplo de la aplicación de Sistema PORT 21 es la simulación del Huracán Irma, el cual fue medido con el satélite GOES (Figura 15), y simulado con datos del 5/9/17 (Figura 16a) y con datos del 7/9/17 (Figura 16b). La diferencia temporal entre la imagen satelital y la simulada es de 37 minutos. Las simulaciones utilizan datos distintos para la predicción, una con datos de dos días antes del pronóstico y otra del mismo día.

La comparación con las Figuras 16 a y b muestra una ubicación del Huracán frente a las costas de Puerto Rico,

en una posición más al E ya a que la imagen del satélite es de 37 minutos antes del tiempo de la imagen simulada, y la dirección de avance de Irma es hacia el O. Se aprecia que el detalle de la información es mayor a medida que la ventana de pronóstico se reduce de 72 a menos de 12 hs.

4. Consideraciones finales

Se han dado pasos concretos y significativos para construir una herramienta operativa como PORT 21, buscando un sistema de Oceanografía Operacional

Previsión día 15/10/2014, con horizonte temporal de 72 horas

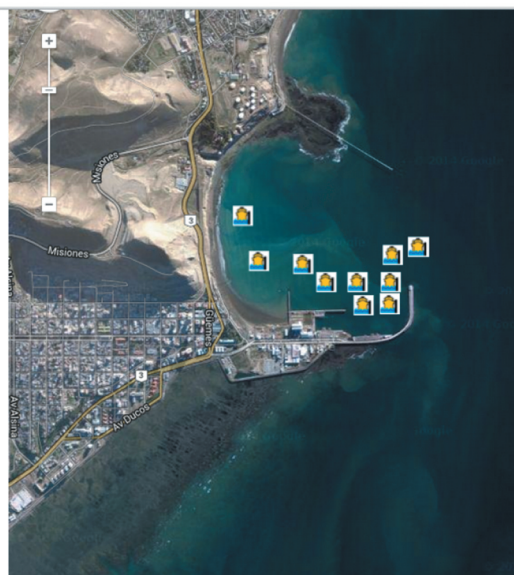
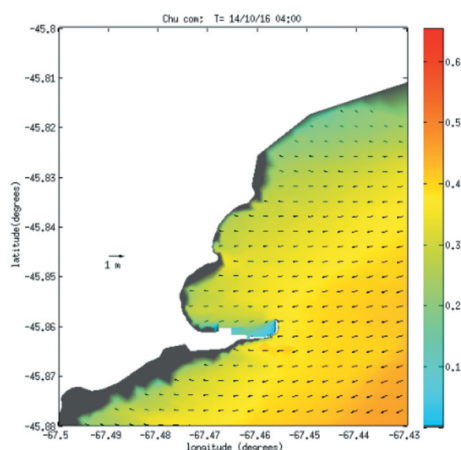


Figura 8. Ejemplo de Dominio Litoral (izquierda) con previsión de oleaje para el 16/10/2014 e imagen del Puerto de Comodoro Rivadavia (derecha).

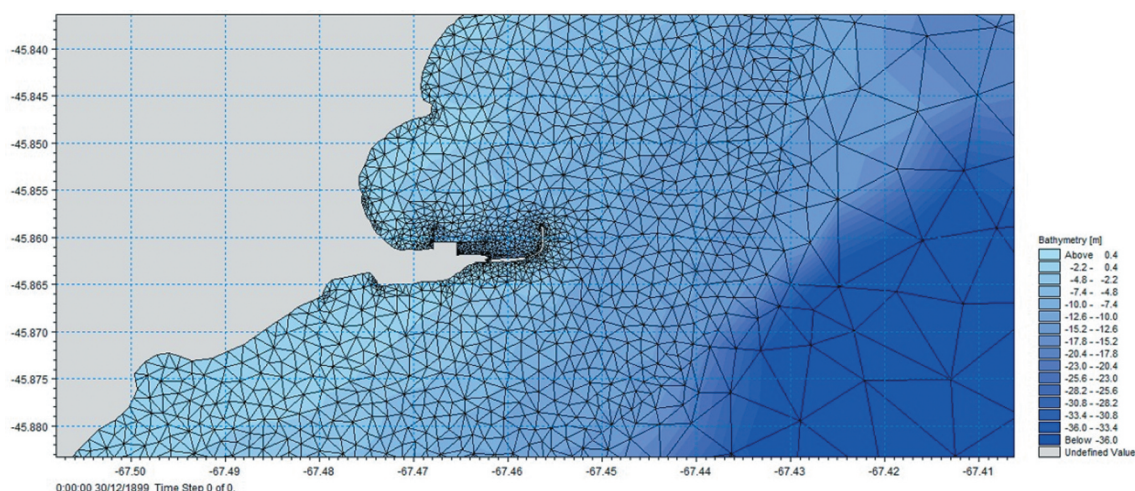


Figura 9. Mallado de detalle Sub Dominio PU: Puerto de Comodoro Rivadavia.

(OO) capaz de satisfacer en forma cabal y oportuna algunas de las necesidades operativas más importantes de las entidades que operan en la zona costera. Para ello se han acoplado modelos matemáticos confiables y abiertos, de distinta naturaleza, lo que constituye un aporte valioso (innovador en la región) para la Oceanografía costera. Además, todo lo anterior se realiza en tiempo real y de manera automatizada, lo que le confiere un mayor valor a la herramienta hasta ahora desarrollada.

Sin embargo, y a pesar de los promisorios resultados conseguidos con el sistema, los autores de PORT 21 son conscientes de que el sistema está todavía en sus

primeras etapas de construcción, por lo cual que debe ser calibrado con más datos, previo a ser una herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Los diferentes módulos del sistema deben continuar siendo sometidos a un proceso de calibración, probando que los resultados entregados por éste se ajustan adecuadamente a la realidad en las diferentes cuencas y regiones en que este se aplica.

Específicamente, sobre la versión actual de PORT 21 se puede afirmar lo siguiente:

1. Se ha alcanzado un satisfactorio grado de desarrollo de la metodología que es utilizada por el sistema de previsión de oleaje en su versión pre-operacional, PORT

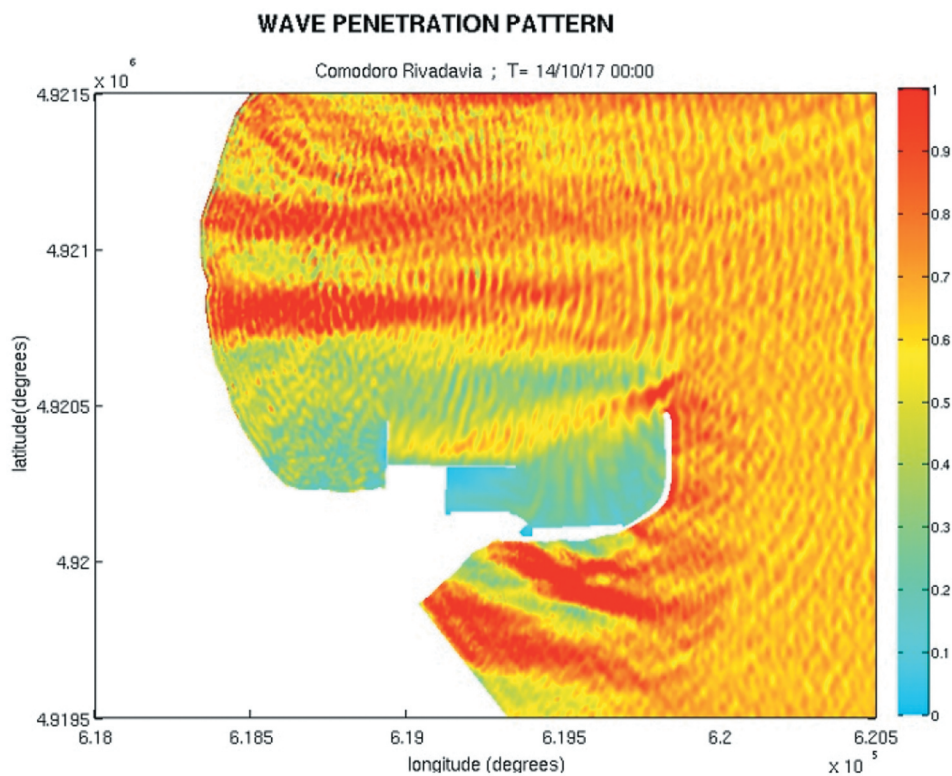


Figura 10. Resultados de altura de ola para el 17/10/2014 en el subdominio portuario (PU) de Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina.

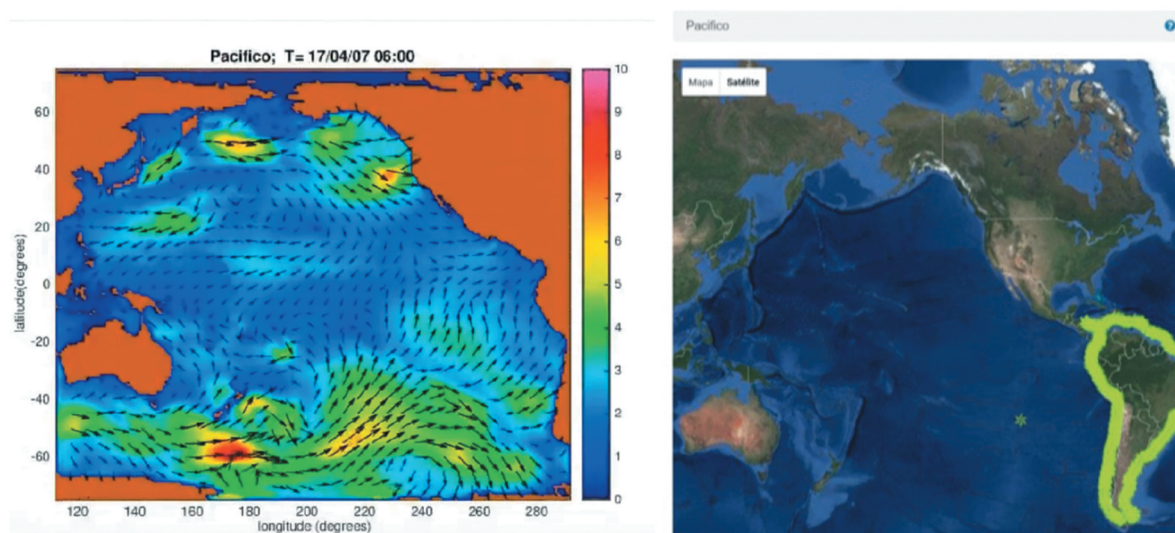


Figura 11. Ejemplo de Dominio Oceánico OC: Cuenca del Pacífico.

21, estableciéndose perfectamente los requerimientos de entrada y salida del sistema.

2. Se ha conseguido desarrollar una primera versión de PORT 21, implementada en el sistema operativo Linux, constituida principalmente por versiones

multiproceso de los modelos WAVEWATCH III (3.14) y SWAN (4091), que ha sido validada y calibrada exitosamente en distintos ambientes marítimos para los cuales se ha dispuesto de datos en el dominio público.

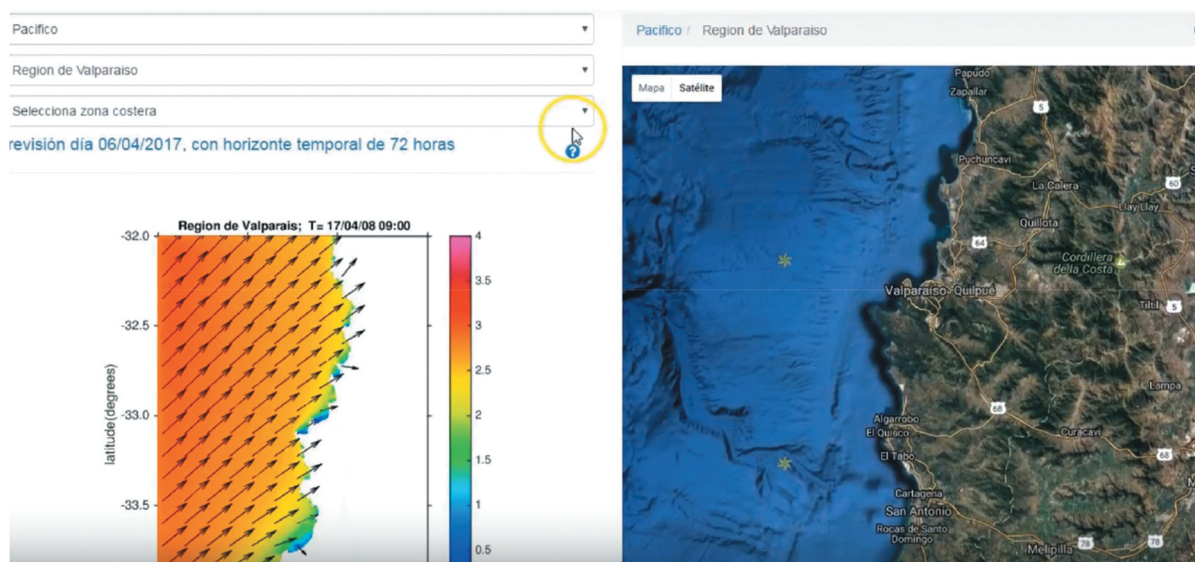


Figura 12. Ejemplo de Dominio Local LO: Región de Valparaíso.

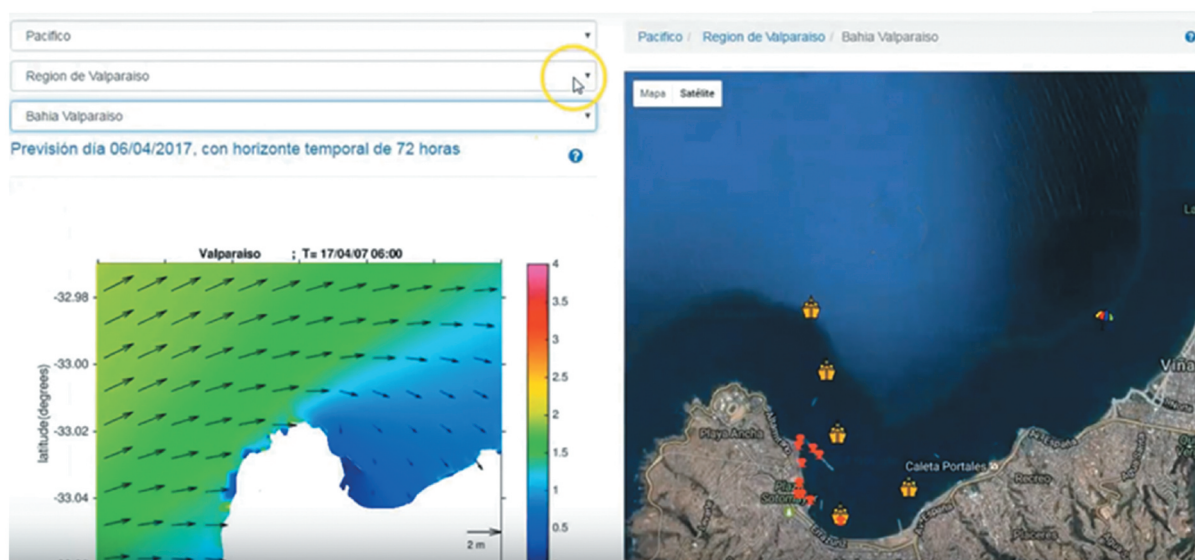


Figura 13. Ejemplo de Dominio Litoral LI: Bahía de Valparaíso.

3. Se han modificado algunos de los módulos de entrada y salida de los modelos numéricos WW3, SWAN y ARTEMIS para adaptarlos y especializarlos a las necesidades metodológicas de PORT 21. Dichos cambios no afectan los módulos de cálculo de los modelos, y se traducen en un aumento de la eficiencia global del sistema y un ahorro significativo en los tiempos de obtención de la previsión.

4. Se ha desarrollado un completo conjunto de herramientas informáticas para facilitar la obtención de la información de entrada requerida por PORT 21, proveniente principalmente de la NOAA, y la

representación gráfica de los resultados de PORT 21, proveniente principalmente de los modelos numéricos que utiliza. Se presentó un ejemplo de calibración del oleaje simulado en la costa de Valparaíso versus mediciones de la NOAA, y tres ejemplos de pronósticos uno en las costas del Atlántico Sur, otro en las costas del Pacífico Sur y un tercero correspondiente al Huracán Irma.

5. La implementación del modelo ARTEMIS y ADCIRC aún se encuentra en fase de desarrollo, siendo alentadores los resultados preliminares obtenidos hasta ahora en las vertientes Sur del Atlántico (con ejemplos

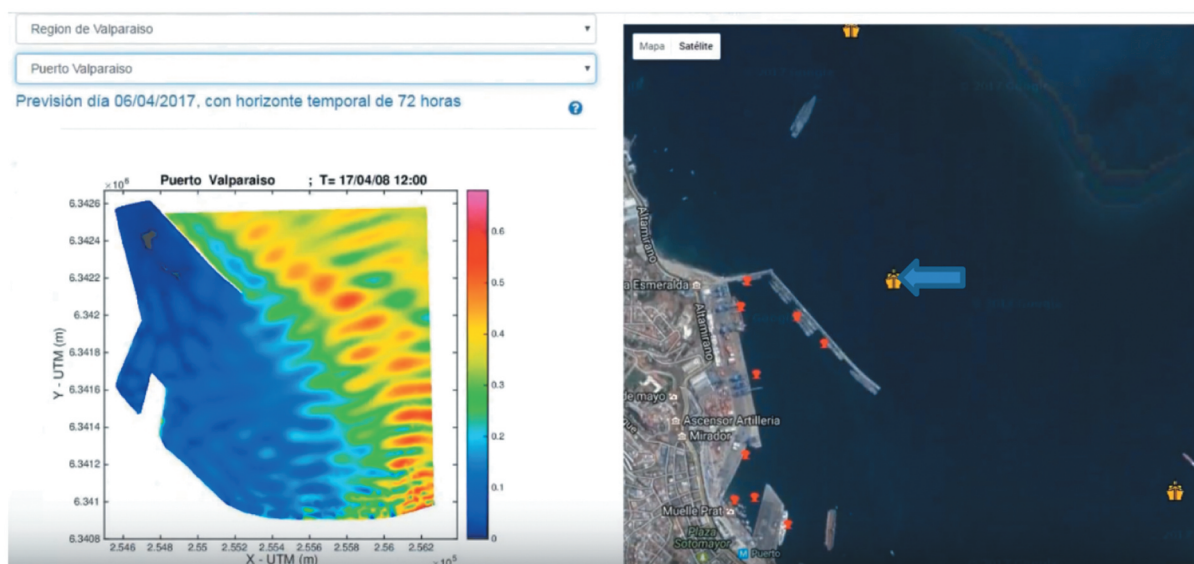


Figura 14. Ejemplo de agitación para el Subdominio PU en Valparaíso (06/04/17). La flecha azul indica la Boya numérica 002 utilizada para simular el interior.

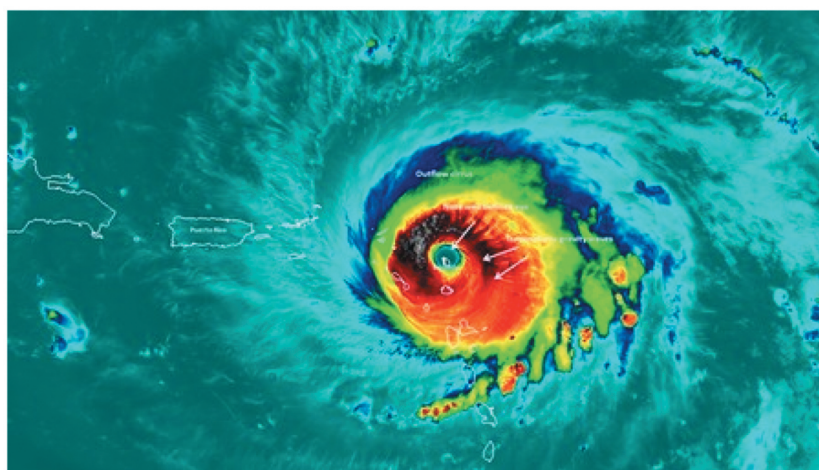


Figura 15. Imagen GOES del Huracán IRMA, día 07/09/2017, 23:23 hs.

de anidado en la Costa Patagónica Argentina hasta el 4to. nivel portuario en Comodoro Rivadavia) y Pacífico (con ejemplos de anidado en la costa de la Región de Valparaíso hasta subdominio Portuario en el Puerto homónimo).

6. Se han optimizados los pasos temporales que determinan la estabilidad de los modelos WW3 y SWAN para reducir al máximo los tiempos de cálculo para una configuración de hardware determinada.

7. Se ha comprobado que el sistema PORT 21 también puede ser una herramienta valiosa para hacer también *hindcasting* (con información retrospectiva).

8. El proceso de validación de los módulos de propagación y agitación del oleaje ha concluido, estando todavía en curso la validación del módulo de corriente. La calibración de los diferentes módulos del sistema está actualmente en desarrollo, y se considera que los resultados todavía no se han contrastado suficientemente con datos de campo. Para suplir esta deficiencia, debe señalarse que se está recopilando información de diferentes campañas de oleaje y de corrientes que se encuentran disponibles en algunas localizaciones del litoral chileno.

De esta forma, puede mencionarse que PORT 21 está en condiciones de comenzar a funcionar como

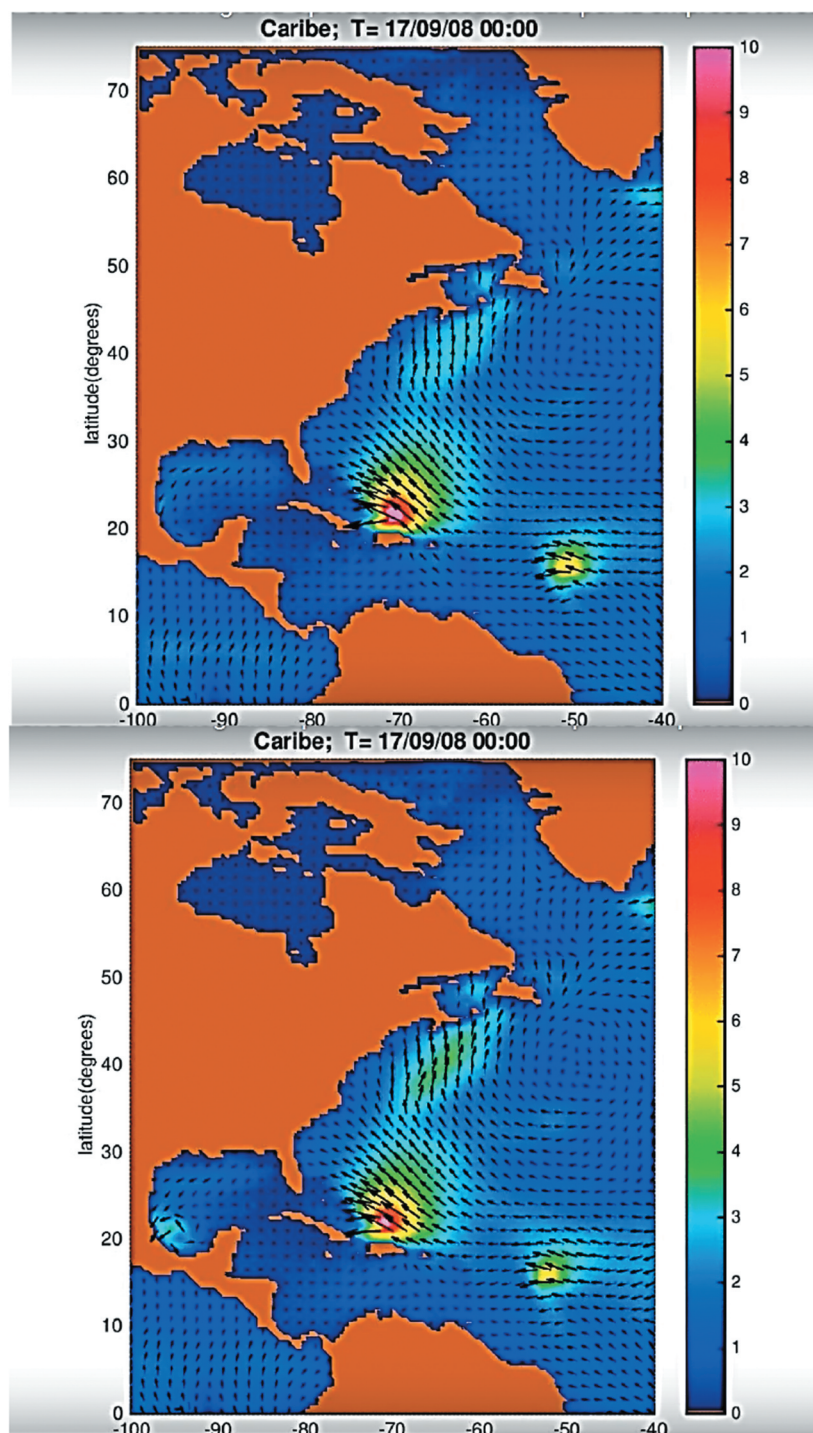


Figura 16. (a, arriba) Simulación del Huracán IRMA, 08/09/2017, 00:00 hs, con datos del 5/9/17. (b, abajo) Simulación con datos del 7/9/17.

sistema de previsión propiamente tal, obteniéndose sistemáticamente para la previsión de oleaje diaria a lo largo del primer dominio seleccionado como test pre-operativo (la costa chilena), donde se han mostrado resultados para la Costa de Valparaíso.

Agradecimientos

Se señala que este trabajo ha sido parcialmente apoyado por la infraestructura de supercomputación del NLHPC (ECM-02), liderado por el Centro de Modelamiento Matemático (CMM) de la Universidad de Chile.

Bibliografía

- ADCIRC. (2014). User's manual – V50. A (parallel) advanced circulation model for oceanic, coastal and estuarine waters. <https://adcirc.org/home/documentation/users-manual-v50/>.
- Aelbrecht, D. (1997). ARTEMIS 3.0: A finite element model for predicting wave agitation in coastal areas and harbours including dissipation. WIT Transactions on The Built Environment, 30. DOI: 10.2495/CE970331.
- ARTEMIS. (2014). Manual de Usuario del modelo Artemis de Telemac. <http://wiki.opentelemac.org>.
- Booij, N., Holthuijsen, L.H., y Ris, R.C. (1996). The 'SWAN' wave model for shallow water. 25th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Orlando, FL.
- Dietrich, J., Zijlema, M., Westernink, J., et al. (2011). Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. Coastal Engineering, 58, 45–65.
- Etala, P., Alonso, S.M., Souto, D., Romero, C., y Echevarría, P. (2014). Progreso en el modelo de pronóstico de olas hasta un mosaico global multiescala. Meteorológica, 39 (2), 37–48.
- Gyssels, P., Pagot, M., Hillman, G., Muratore, H., y Rodriguez, A. (2013). Estudio de estabilidad de un dique exento semi-sumergido mediante modelo físico. Tecnología y Ciencias del Agua, IMTA, IV(4), 5–18.
- Gyssels, P., Vidal, C., y Rodriguez, A. (2015). Experimental comparison to test the eligibility of the wave parameters H50t y H50i in the stability formulation for overtopped breakwaters. Revista Iberoamericana del Agua, 2 (1), 14–25.
- Huang, H. (2009). The mild-slope equations. In Dynamics of Surface Waves in Coastal Waters. Berlin: Springer.
- Luettich, R.A., Jr, y Westerink, J.J. (2004). Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model version 44.XX, 74 pg. ADCIRC Web Portal, The University of North Carolina at Chapel Hill, NC.
- Luettich, R.A., Jr., Westerink, J.J., y Scheffner, N.W. (1992). ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1. Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL.
- Qiao, F., Wang, G., Khokiattiwong, S., Fadzil Akhir, M., Zhu, M., y Xiao, B. (2019). China published ocean forecasting system for the 21st-Century Maritime Silk Road on December 10, 2018. Acta Oceanologica Sinica, 38, 1–3.
- Rodríguez, A., Hillman, G., Pagot, C., Vionnet, C., y Sierra, J. P. (2005). Actualización del clima marítimo y simulación de propagación del oleaje de diseño para el puerto Caleta La Mision, Tierra del Fuego, Atlántico Sur, Arg. Mecánica Computacional, XXIV, 193–206.
- Rusu, L., y Soares, C.G. (2013). Evaluation of a high-resolution wave forecasting system for the approaches to ports. Ocean Engineering, 58, 224–238.
- Salinas Prieto, J.A. (2014). Sistema de pronóstico numérico de oleaje para las costas mexicanas utilizando modelos acoplados. Informes de Proyectos [76], IMTA, México.
- Sandhya, K.G., Murty, P.L.N., Deshmukh, A.N., Balakrishnan, T.M., y Sheno, N. (2018). An operational wave forecasting system for the east coast of India. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 202 (5), 114–124.
- SWAN. (2006). Technical documentation, Delft University of Technology. <http://swanmodel.sourceforge.net/>.
- Tonani, M., Sykes, P., King, R., et al. (2019). The impact of a new high-resolution ocean model on the Met Office North-West European Shelf forecasting system. Ocean Science, 15 (4), 1133–1158.
- Tolman, H. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14, Technical note. MMAB Contribution 276, NCEP, NOAA.
- Wamdi Group. (1988). The WAM model—a third generation ocean wave prediction model. Journal of Physical Oceanography, 18(12), 1775–1810.
- Westerink, J.J., Blain, C., Luettich, R.A., Jr, y Scheffner, N.W. (1994). ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 2. User's Manual for ADCIRC-2DDI. Tech. Report DRP-92-6, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.